

Eero Turto

# KESKIJÄNNITEVERKON YLIJÄNNITESUOJAUS

Sähkötekniikan koulutusohjelma  
2017

# KESKIJÄNNITEVERKON YLIJÄNNITESUOJAUS

Turto, Eero  
Satakunnan ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Toukokuu 2017  
Sivumäärä: 33  
Liitteitä: -

Asiasanat: keskijänniteverkko, ukkonen, ylijännite, ylijännitesuojaus

---

Opinnäytetyön tarkoituksena on saada ymmärrys ukkosen ja salamoiden synnystä Suomessa ja siitä miten nämä synnyttävät ylijännitteitä keskijänniteverkkoon. Lisäksi perehdytään miten erilaisia ylijännitteitä syntyy, sekä millaisia ylijännitesuojausvaihtoehtoja keskijänniteverkolle on olemassa ja miten ylijännitesuojaus on mahdollista toteuttaa.

Ilmastolliset ylijännitteet ovat isoin ylijännitemuoto keskijänniteverkolle. Siksi avojohtojen ylijännitesuojaukseen on kiinnitetty erityistä huomiota, jotta jälleenkytkennät ja muuntajavauriot saataisiin minimoitua. Nykyinen linjaus, jossa keskijänniteverkkoa rakennetaan paljon maan alle, helpottaa keskijänniteverkon suojausta ukkosen aiheuttamilta ylijännitteiltä.

# OVERVOLTAGE PROTECTION IN MEDIUM VOLTAGE NETWORK

Turto, Eero

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Electrical Engineering

May 2017

Number of pages: 33

Appendices: -

Keywords: medium voltage network, thunder, overvoltage, overvoltage protection

---

The purpose of this thesis was to understand how thunder and lightning arose in Finland and how these generate overvoltages to the medium voltage network. In addition, will learn how overvoltages arose and what types of overvoltage protection alternatives exist for the medium voltage network and how the overvoltage protection is implemented.

Climatic overvoltages are the biggest overvoltage form for medium voltage networks. Special attention has been paid to the overvoltage protection of cables to minimize reconnections and transformation problems. The current orientation of building medium voltage network underground is facilitating the protection of the medium voltage network from overvoltage caused by thunderstorms.

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	UKKONEN JA SALAMAT SUOMESSA .....	6
2.1	Ukkonen.....	6
2.1.1	Rintamaukkonen.....	7
2.1.2	Ilmamassaukkonen .....	8
2.1.3	Ukkosen voimakkuus .....	8
2.2	Salamat.....	8
2.2.1	Pilvisalamat .....	9
2.2.2	Negatiiviset maasalamat .....	9
2.2.3	Positiiviset maasalamat .....	11
2.3	Ukkospäivät ja salamatiheys.....	11
3	YLIJÄNNITTEET.....	14
3.1	Pientaajuiset ylijännitteet .....	15
3.2	Loivat transienttiylijännitteet .....	16
3.3	Jyrkät transienttiylijännitteet.....	16
3.3.1	Suorat salamaniskut.....	16
3.3.2	Takaisku .....	17
3.3.3	Indusoituvat ylijännitteet .....	17
4	KESKIJÄNNITEVERKON YLIJÄNNITESUOJAUS .....	18
4.1	Eristyskoordinaatio .....	18
4.2	Kipinäväli.....	19
4.3	Venttiilisuojat.....	20
4.3.1	Levykipinävälisuoja .....	21
4.3.2	Magneettipuhallussuoja.....	22
4.3.3	Metallioksidisuojat .....	23
4.4	Yhdistelmäsuojat.....	25
4.5	Ylijännitesuojaus avojohtoverkossa.....	26
4.5.1	Kipinävälit .....	26
4.5.2	Venttiilisuojat .....	27
4.6	Ylijännitesuojaus PAS-verkossa.....	27
4.7	Ylijännitesuojaus maakaapeliverkossa .....	29
4.8	Muuntajien suojaus .....	30
5	LOPPUPÄÄTELMÄT .....	31
	LÄHTEET .....	33
	LIITTEET	

# 1 JOHDANTO

Ukkosen aiheuttamat ylijännitteet ovat merkittävin ylijännitemuoto keskijänniteverkolla. Ylijännitteet aiheuttavat verkon komponenteille rasitusta, mikä heikentää niiden toimintaa, sekä elinikää. Ylijännitteitä pystytään rajoittamaan erilaisilla ylijännitesuojilla ja suojaamaan näin verkon tärkeitä komponentteja. Osa ylijännitesuojista aiheuttaa toimiessaan verkossa jälleen kytkennän. Siksi on tärkeää pohtia ylijännitesuojauksen toteutustapaa, jotta ratkaisu olisi mahdollisimman toimiva ja kustannustehokas.

Opinnäytetyössä selvitettiin ukkosen ja salamoiden syntyä, sekä mitä eri vaihtoehtoja on ylijännitesuojaukselle. Kuinka keskijänniteverkko voidaan suojata ilmastollisilta ylijännitteiltä ja tietenkin muiltakin mahdollisilta ylijännitteiltä.

Toisessa luvussa perehdytään ukkosen ja salamoiden syntyyn Suomessa ja milloin ukkosta esiintyy. Kolmannessa luvussa tutkitaan ylijännitteiden eri muodot ja syvennytään ukkosen aiheuttamiin ylijännitetyyppeihin. Neljännessä luvussa käydään lävitse erilaisia ylijännitesuojia, sekä niiden ominaisuuksia. Luvussa esitetään myös, kuinka eri johdinlajeilla ylijännitesuojaus on mahdollista rakentaa.

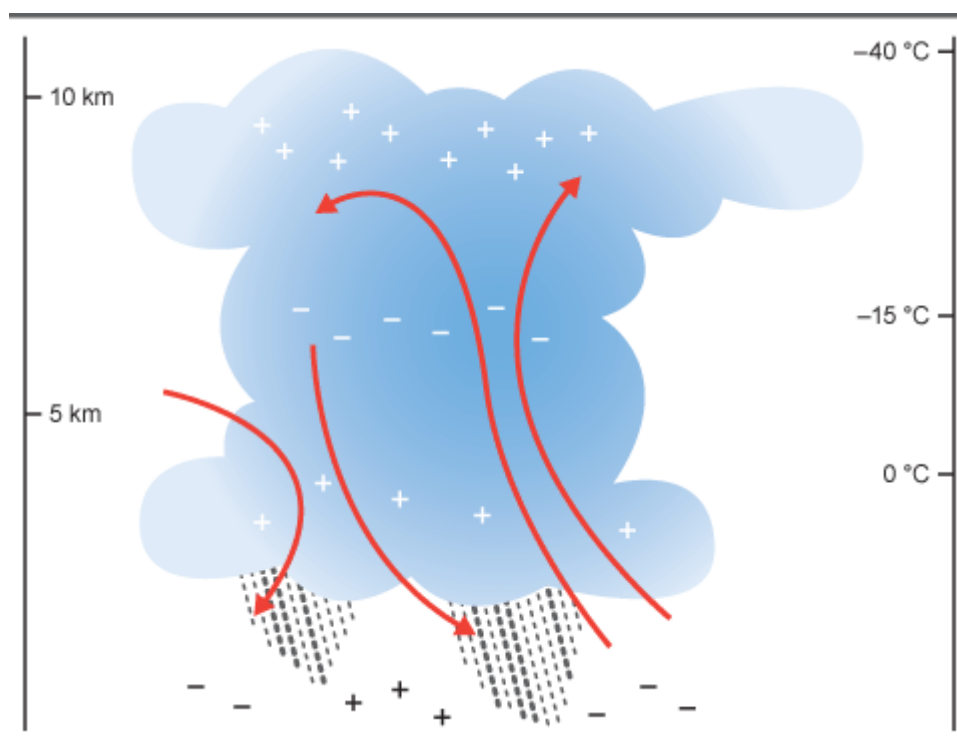
## 2 UKKONEN JA SALAMAT SUOMESSA

Ukkoset ovat maapallonlaajuisia ilmasähköpiirejä, joissa muodostuu salamoita. Ilmasähkö koostuu kahdesta alueesta, hyvän sään ja huonon sään ilmasähköstä. Huonon sään ilmasähköön kuuluvat osana salamat.

Tässä luvussa esitellään ukkosen ja salamoiden syntyä, sekä niiden eri muotoja.

### 2.1 Ukkonen

Ukkospilvi kehittyy kuuropilvestä, erinäisten vaiheiden johdosta. Myöhemmin ukkospilvi sähköistyy, josta seuraa varauksen purkautuminen salamoina. Ilmavirtaukset kuljettavat jääkiteitä ja huurtumalla kasvavia lumirakeita pilven sisällä ylös ja alas. Ukkospilveen syntyy sähköisiä varauksia, kun jääkiteet törmäävät pilvessä oleviin lumirakeisiin, jolloin syntyy sähkövarauksia. Törmäilyn seurauksena pilven jääkiteistä tulee positiivisesti varautuneita ja lumirakeista negatiivisesti varautuneita. Negatiiviset ja positiiviset varaukset sijaitsevat pilven eri kohdissa, jolloin syntyy pilven eri osien ja maanpinnan väliin varausten välille jännite-ero. Syntynyt jännite-ero purkautuu salamoina. Suurin osa salamoista on ukkospilven sisällä tapahtuvia lyöntejä, noin 20 % salamoista lyö pilvestä kohti maata. (Ilmatieteen laitoksen [www-sivut](http://www.ilmatieteenlaitos.fi) 2017)



Kuva 1. Ukkospilven rakenne. Positiivisen jääkiteen päävarausalue on pilven yläosassa ja heikompi osa alaosassa. Negatiivisen lumirakeen keskus on pilven keskiosissa. Nuolet kuvaavat lasku- ja nousuvirtauksia. (Ilmatieteen laitoksen [www-sivut](http://www.sivut) 2017)

Ukkoset jaotellaan kahteen eri lajiin, niiden synnyn mukaan: rintamaukkosiin sekä ilmamassaukkosiin.

### 2.1.1 Rintamaukkonen

Rintamaukkosissa nousuvirtausten pääasiallinen käyttövoima tulee ilmamassojen eroista. Suomessa rintamia muodostuu, kun etelän lämmin ja kostea, sekä pohjoisen kylmä ja kuiva ilmamassa joutuvat kosketuksiin. Massat virtaavat keskimäärin lännestä itään. Lämpimässä rintamassa lämmin ilmamassa nousee kylmän päälle, kylmässä rintamassa kylmä ilmamassa kiilautuu lämpimän alle. (Ilmatieteen laitoksen [www-sivut](http://www.sivut) 2017)

### 2.1.2 Ilmamassaukkonen

Selvimmin erottuvat yksittäiset ukkospilvet esiintyvät ns. ilmamassaukkosissa. Aurin-  
gon lämmitys maanpinnassa etenkin iltapäivällä voi laukaista nousuvirtaukset. Nou-  
seva maasto, sekä kylmän ilman "pisaran" virtaaminen lämpimän ja kostean pintail-  
man yläpuolelle voivat aiheuttaa nousuvirtauksien syntymisen. Useissa tapauksissa ra-  
juja ilmamassaukkosia esiintyy etenkin kylmän rintaman etupuolella useimmiten  
idässä. (Ilmatieteen laitoksen [www-sivut 2017](#))

### 2.1.3 Ukkosen voimakkuus

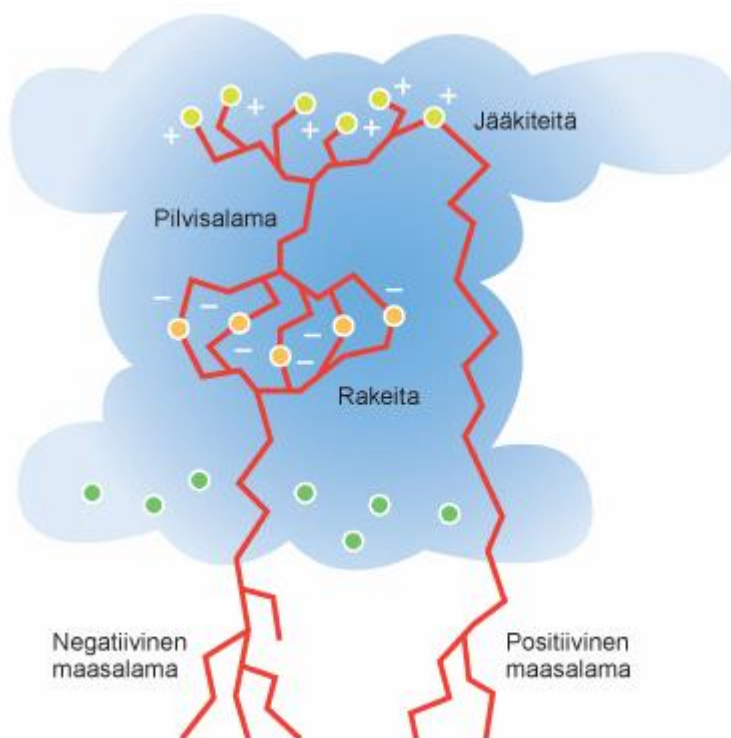
Voimakkaimmat ukkoset syntyvät kylmässä rintamassa matalapaineen lähellä, jossa  
rintaman liike on poikittaista ja nopeaa. Kauempana matalapaineesta rintaman liike on  
pitkittäisempää ja ukkoset ovat heikompia. Parhaimmat lähtökohdat voimakkaille uk-  
kossille syntyy, kun matalapaineiden reitti on sellainen, että lämpimän sektorin ilma  
kulkee Itä-Euroopan kautta Suomeen. Silloin ilmamassassa on paljon lämpöä ja kos-  
teutta. Lounaasta saapuvat matalapaineet eivät yleensä aiheuta kovinkaan voimakkaita  
ukkosia. (Ilmatieteen laitoksen [www-sivut 2017](#))

## 2.2 Salamet

Kun ukkospilven varausalueisiin on syntynyt riittävä varaus, niin ilman sähkölujuus  
pettää ja alkaa salamointi. Kokonaisjännite pilven varausalueiden välillä, tai varaus-  
alueiden ja maan välillä on silloin sadan miljoonan voltin luokkaa. (Ilmatieteen laitok-  
sen [www-sivut 2017](#))

Salamalla on kolme lajia ja ne ovat pilvisalama, negatiivinen maasalama, sekä positiivinen  
maasalama. Näistä salamoista, maasalama iskee ainoastaan maahan saakka. Pil-  
visalama purkautuu pääsääntöisesti pilvessä, joskus hieman pilven ulkopuolella, mutta  
ei koskaan ulotu maahan asti. Useimmiten näemme juuri maasalamoita, koska ne ovat  
helpoiten havaittavissa. Pilvisalama näyttää usein kajastukselta ukkospilven sisällä.  
Suomessa pilvisalamoita on noin 80 % kaikista salamoista ja maasalamoista negatiivisia  
on 85 %. (Ilmatieteen laitoksen [www-sivut 2017](#))





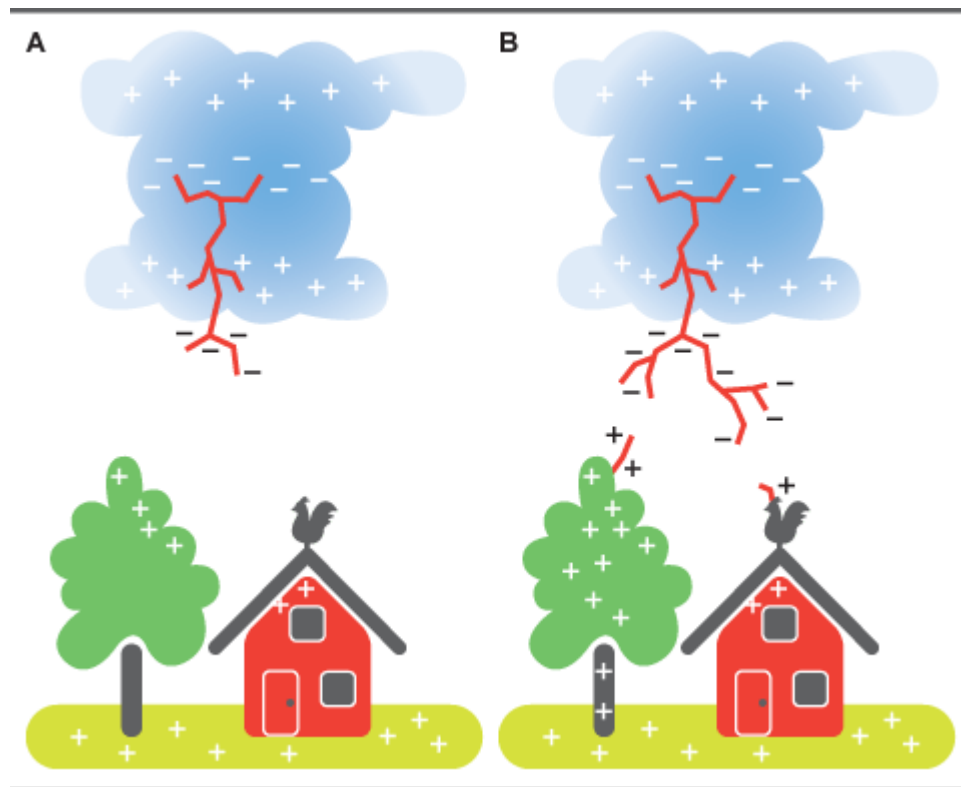
Kuva 2. Salamoiden lajit. (Ilmatieteen laitoksen www-sivut 2017)

### 2.2.1 Pilvisalamat

Pilvisalamassa esipurkaus alkaa varausten välisestä alueesta kasvaen alaspäin positiivisena kohti negatiivista aluetta ja ylöspäin negatiivisena kohti positiivista aluetta. Kun alempi pää on löytänyt tarpeeksi negatiivista varausta, se jatkaa matkaa syöksymällä kanavaan, kohti yläpäättä ja neutraloimaan positiivista aluetta. Purkauksia esiintyy peräkkäin kymmenkunta ja ne ovat todella nopeita. Pilvisalama kestää ainoastaan noin puoli sekuntia. (Ilmatieteen laitoksen www-sivut 2017)

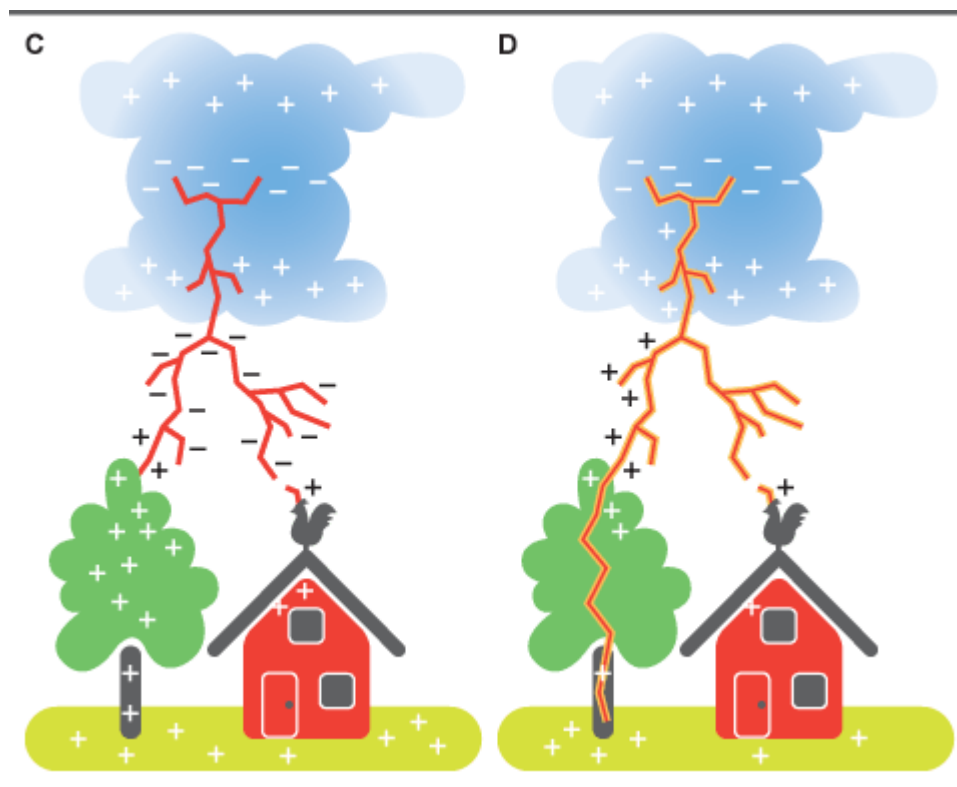
### 2.2.2 Negatiiviset maasalamat

Negatiivinen maasalama saa alkunsa negatiivisen ja alemman positiivisen varauskeskuksen välistä. Esisalamen positiivinen pää etenee ylöspäin negatiiviseen varausalueeseen ja jatkaa siinä vaakasuorina haaroina. Negatiivinen pää etenee askeltaen alaspäin ja haaroittuen askeltavana esisalamana kohti maata. Kun esisalama on noin 100 metrin päässä maasta tai maassa olevasta rakennuksesta, nousee maasta tai rakennuksesta positiivinen vastaesisalama. (Ilmatieteen laitoksen www-sivut 2017)



Kuva 3. Negatiivisen salamman vaiheet. (A) Esisalama ja (B) vastaesisalama. (Ilmatieteen laitoksen www-sivut 2017)

Esisalaman ja vastaesisalaman kohdatessa nämä täydentävät sähköä johtavan reitin maan ja pilven välillä. Kyseistä maan ja pilven yhteyttä kutsutaan salamakanavaksi. (Ilmatieteen laitoksen www-sivut 2017)



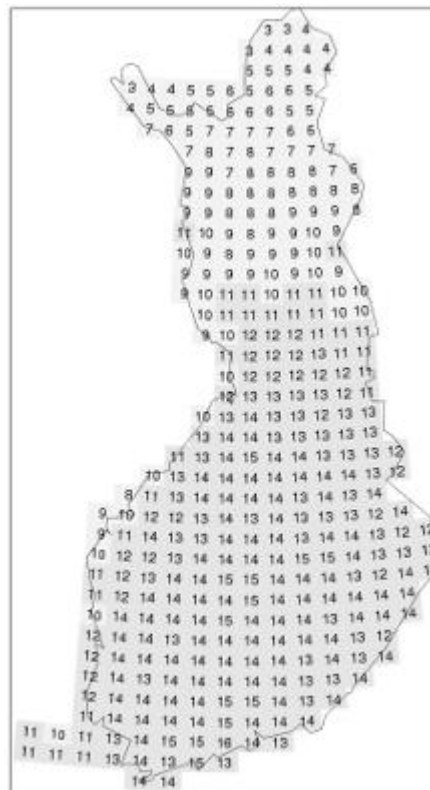
Kuva 4. Negatiivisen salamän vaiheet. (C) Sähköä johtava reitti. (D) Salamakanava. (Ilmatieteen laitoksen www-sivut 2017)

### 2.2.3 Positiiviset maasalamat

Positiivinen maasalama syntyy useimmiten pilven yläosan positiivisessa varausalueessa. Kyseinen maasalama etenee askeltamatta ja haaroittuu huomattavasti vähemmän kuin negatiivinen maasalama. Tästä johtuen positiivinen maasalama on noin kymmenen kertaa nopeampi kuin negatiivinen maasalama. Positiivisia salamoita kehittyy eniten ukkosien loppupuolella, kun negatiivinen varausalue ja niissä syntyneet negatiiviset maasalamat ovat ehtyneet, jolloin positiivisella on helpompi väylä kohti maata. (Ilmatieteen laitoksen www-sivut 2017)

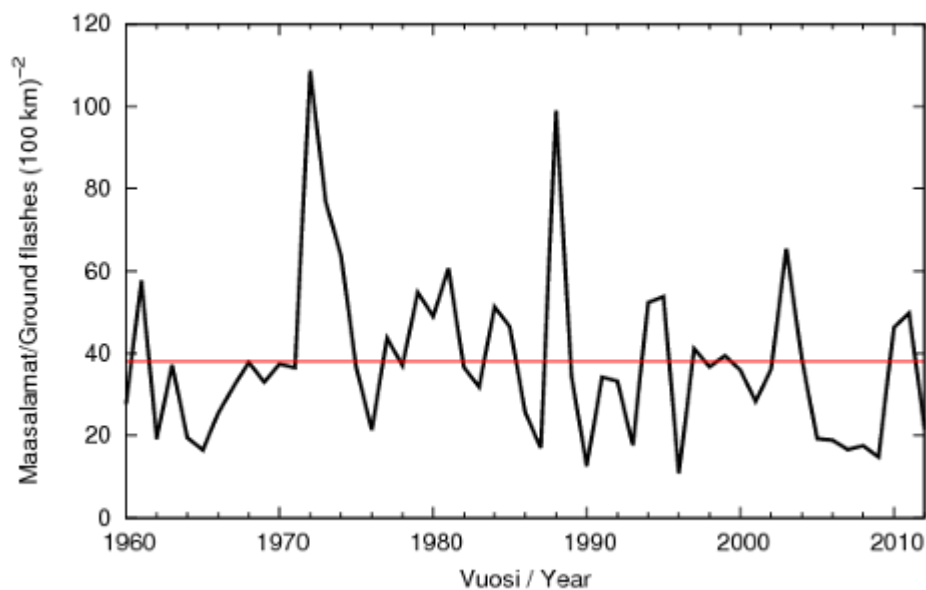
## 2.3 Ukkospäivät ja salamatiheys

Suomessa ukkoskausi ulottuu toukokuusta aina syyskuuhun saakka. Ukkosia esiintyy ukkoskauden ulkopuolellakin mutta niiden vaikutus tilastoihin on hyvin pieni. Ukkoskauden aikana ukkosia esiintyy noin 100 päivänä. Paikallisesti ukkospäiviä on keskimäärin 12 ympäri Suomea. (Ilmatieteen laitoksen www-sivut 2017)

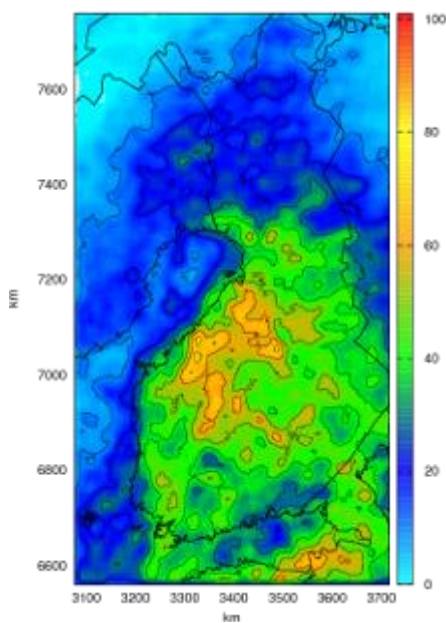


Kuva 5. Keskimääräinen ukkospäiväluku 1998-2012. (Ilmatieteen laitoksen www-sivut 2017)

Salamatiheys lasketaan salamoiden lukumäärää pinta-alayksikköä kohden, jollakin ajan jaksolla. Pinta-alana jolle tiheys lasketaan on  $100 \text{ km}^2$ , eli  $10 \text{ km} * 10 \text{ km}$  ruutu. Kuvassa 6 on jakson 1960-2010 keskimääräinen koko maan salamatiheys ja kuvassa 7 maantieteellinen jakauma. (Ilmatieteen laitoksen www-sivut 2017)



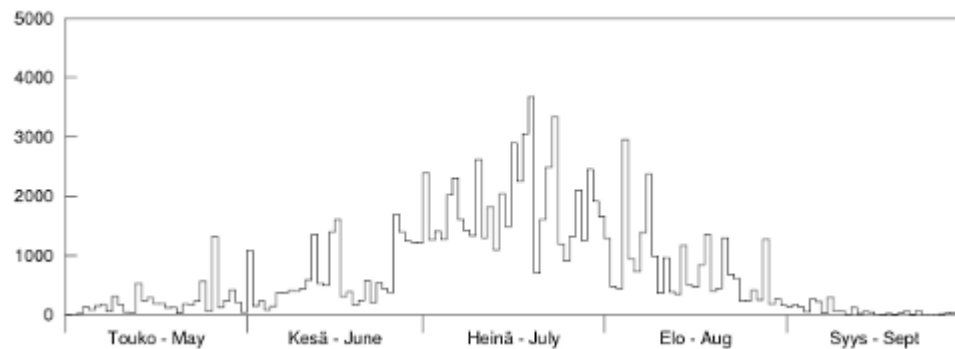
Kuva 6. Jakson 1960-2010 keskimääräinen maasalamatiheys, salamoita sadalle neliökilometrille. Punainen viiva kuvaa keskiarvoa (38 sal./100km<sup>2</sup>). (Ilmatieteen laitoksen www-sivut 2017)



Kuva 7. Keskimääräinen maasalamatiheys, salamoita sataa neliökilometriä kohden jaksolla 1998-2012. (Ilmatieteen laitoksen www-sivut 2017)

Salamatiheydessä esiintyy luonnollisesti vuosittaista vaihtelua, kuten säässä yleensäkin. Toisinaan ukkosia ja salamoita on runsaasti ja toisena vuonna niitä on harvakseltaan. Jakson 1960-2011 runsaimmat salamavuodet ovat olleet 1972 ja 1988, jolloin Suomessa havainnointiin yli 300 000 maasalamaa. Keskimäärin vuodessa on 140 000

maasalamaa. Viimeisten kymmenen vuoden aikana salamointi on painottunut maan itä- ja länsiosiin. (Ilmatieteen laitoksen www-sivut 2017)




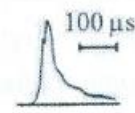
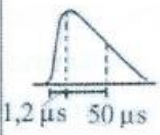
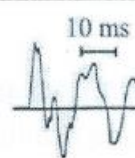
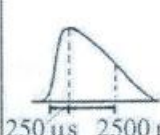

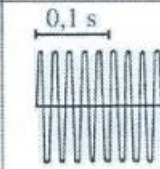
Kuva 8. Suomen keskimääräiset vuorokautiset maasalamamäärät jaksolla 1998-2012. (Ilmatieteen laitoksen www-sivut 2017)

### 3 YLIJÄNNITTEET

Ylijännitteitä syntyy useiden eri tekijöiden johdosta. Ylijännitteet on aikaisemmin luokiteltu alkuperän perusteella, mutta nykyään ne luokitellaan muodon mukaan. Luokat menevät seuraavasti, suluissa vanha termi:

- Pientaajuiset ylijännitteet (käyttötaajuiset ylijännitteet)
- Loivat transienttiylijännitteet (kytkentäylijännitteet)
- Jyrkät transienttiylijännitteet (ilmastolliset ylijännitteet)
- Erittäin jyrkät transienttiylijännitteet

(Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva 2015, 253.)

Nimi		Ylijännitteen muoto	Koejännitteen muoto
transientti- yli­jännite	Erittäin jyrkkä		Sovitaan laitekohtaisesti
	jyrkkä		
	loiva		
Pientaajuinen ylijännite			

Kuva 8. Ylijännitelajit ja koejännitemuodot. (Aro ym. 2015, 254.)

Kaikki ylijännitteet heikentävät sähköverkon komponentteja. Komponentteihin kohdistuvia rasituksia voidaan tehokkaasti ehkäistä erilaisilla ylijännitesuojauksilla. Keski­jänniteverkon näkökulmasta merkittäv­in ylijännitemuoto ovat jyrkät transienttiylijännitteet.

### 3.1 Pientaajuiset ylijännitteet

Pientaajuiset ylijännitteet ovat käyttötaajuisia ylijännitteitä, jotka kestävät suhteellisen pitkään, eivätkä vaimene tai vaimenevat huonosti. Pientaajuiset ylijännitteet muodostuvat yleensä:

- Vioista, esim. verkon maasulku
- Kyt­kentä­ta­pahtumista, esim. kuorman tippuminen verkosta
- Resonansseista
- Vajaanapainen toiminta tai katkos
- generaattoreiden itseherätys

(Aro ym. 2015, 255.)

### 3.2 Loivat transienttilylijännitteet

Loivat transienttilylijännitteet voivat syntyä vioista, kytkentätoimenpiteistä, tai hyvin kaukaisista johtimiin osuneista suorista salamaniskuista. Loivien transienttilylijännitteiden kanssa saattaa esiintyä myös pientaajuisia ylijännitteitä. Tavallisin loivan transienttilylijännitteen aiheuttaja on jonkin kuorman kytkeminen verkkoon. (SFS 601 2009, 179)

### 3.3 Jyrkät transienttilylijännitteet

Pääasiassa ukkosista ja salamaniskujen seurauksina syntyvät ilmastolliset ylijännitteet eli jyrkät transienttilylijännitteet ovat merkittävin ylijännitemuoto keskijänniteverkolle. Ylijännite muodostuu suorista salamaniskuista jännitteisiin johtimiin, tai takaiskuna, jossa salama osuu jännitteettömään osaan. Myös johtojen lähelle osuneet salamat saattavat aiheuttaa induktion johdosta ylijännitteen. (SFS 601 2009, 179; Aro ym. 2015, 287.)

#### 3.3.1 Suorat salamaniskut

Salaman iskiessä suoraan johtimeen, salamavirta jakaantuu kahteen yhtä suureen kulkuaaltoon. Syntyneet kulkuaallot kulkevat molempiin suuntiin johdinta. Tuloksena muodostunut ylijänniteaallon suuruus saadaan kaavasta 1. (Elovaara & Laiho 2007, 187; Aro ym. 2015, 295.)

Kaava 1.

$$u = \frac{1}{2} * Z_w * i$$

$Z_w$  = johtimen aaltoimpedanssi

$i$  = salamaviran amplitudi

Kerroin  $\frac{1}{2}$  tulee salamavirran jakaantumisesta kahteen osaan



Suorasta salamaniskusta syntyvä jyrkkä transienttiylijännitte on yleensä useita megavoltteja. Tämä johtaa usein kolmivaiheiseen oikosulkuun verkossa. (Elovaara & Laiho 2007, 187; Aro ym. 2015, 295.)

### 3.3.2 Takaisku

Takaisku on mahdollinen kun salama osuu maadoitettuun osaan esimerkiksi pylvääseen. Takaiskuksi kutsutaan tilannetta, jossa salamavirran muodostama jännite ylittää maadoitetun osan ja jännitteellisen johtimen välisen jännitelujuuden. Jännitelujuuden pettäessä syntyy ylilyönti johtimen ja maadoitetun osan välillä. Takaisku on silloin mahdollinen kun salamavirta on riittävän iso tai maadoitusolosuhteet ovat huonot. (Aro ym. 2015, 295.)

Takaiskusta syntyvää ylijännitettä on hankala määrittää, vaikka sitä on tutkittu yli 20 vuotta. Ongelmia suuruutta määrittäessä aiheuttaa mm. pylväiden vaihtelevat maadoitusresistanssit ja jännitepulssin aiheuttama korona ja siitä seuraava pulssin vaimeneminen ja vääristyminen. (Aro ym. 2015, 298.)

### 3.3.3 Indusoituvat ylijännitteet

Keskijänniteverkossa indusoituvat ylijännitteet ovat merkittävän ukkosen aiheuttama ylijännitemuoto. Indusoitunut ylijännite syntyy, kun salama osuu avojohdon lähelle, jolloin pääpurkausvirta aiheuttaa sähkömagneettisen induktion. (Aro ym. 2015, 302.)

Indusoituneet ylijännitteet ovat tavallisesti melko pieniä 200-300 kV. Poikkeuksena tähän on metsässä ja puiden suojassa kulkeva ilmalinja, jolle saattaa aiheutua jopa 500 kV suuruisia jänniterasituksia, kun suurivirtainen salama iskee lähistölle. Indusoituneiden ylijännitteiden suuruutta voidaan arvioida kaavalla 2. (Aro ym. 2015, 303.)

Kaava 2.

$$u_{ind} = kiZ_0 \frac{h}{d}$$

$k = 1,2 - 1,3$  (kerroin, joka huomioi salamavirran etenemisnopeuden)  
 $i$  = salamavirran huippuarvo  
 $Z_0$  = impedanssin dimension omaava vakio  
 $h$  = johdon korkeus  
 $d$  = iskupaikan etäisyys johdosta.

## 4 KESKIJÄNNITEVERKON YLIJÄNNITESUOJAUS

Keskijänniteverkon suojauksessa yksi tärkeä elementti on ylijännitesuojaus. Ylijännitesuojauksella pyritään ehkäisemään verkossa syntyneet ylijännitteet, jotta ne eivät vahingoita verkon komponentteja.

Täysin ideaalia ylijännitesuojaustapaa ei tällä hetkellä ole. Ylijännitetilanteissa ideaalinen suoja muuttuisi pieneksi vastukseksi, jonka kautta energia purkautuisi ilman, että suojattavassa kohteessa jännite nousisi. Purkauksen jälkeen suoja palautuisi johtamattomaan tilaan. Markkinoilla olevat ylijännitesuojat eivät vastaa ideaalista suojaa ja ovat ominaisuuksiltaan erilaisia. Isoin poikkeavuus tulee siinä, että markkinoilla olevien suojien energianpurkauskkyky on hyvin rajallinen. Tämä johtaa siihen, että näitä suojia voidaan käyttää vain lyhytaikaisten ylijännitteiden rajoittamiseen.

Ylijännitteiden suojauksessa on mahdollista käyttää muutamaa erilaista ylijännitesuojaa. Venttiilisuojia, kipinävälejä, sekä näiden yhdistelmää. Venttiilisuojia käytetään kaapelipäätteiden ja pylväsmuuntamoiden suojauksessa. Kipinävälit ovat yleensä käytössä pienemmissä pylväsmuuntamoissa.

### 4.1 Eristyskoordinaatio

Eristyskoordinaation päämäärä on, että sähköverkkojen eristysrakenteiden jännitelujuus mitoitetaan siten, että rakenteet kestävät suurimman osan esiintyvistä jänniterasituksista. Tällä pyritään siihen, että ylijännitteiden aiheuttamien käyttöhäiriöiden ja laiteaurioiden määrä vähenee. Koska ylijännitteet ovat satunnaisia tapahtumia, eristystä ei ole teknisesti eikä taloudellisesti järkevää mitoittaa niin, ettei yli- tai läpilyöntejä ollenkaan tapahtuisi. (Aro ym. 2015, 333.)

Yksi oleellinen asia eristyskoordinaatiossa on ylijännitesuojien ominaisuudet, sekä niiden sijoituspaikkojen valinta. Suojien tehtävä on rajata ylijännitteet niin alhaisiksi, että ne eivät ole vaaraksi eristysrakenteelle. Suojauksessa painotetaan yleensä kalleimpien ja pitkän korjausajan omaavien laitteiden suojausta. (Aro ym. 2015, 333.)

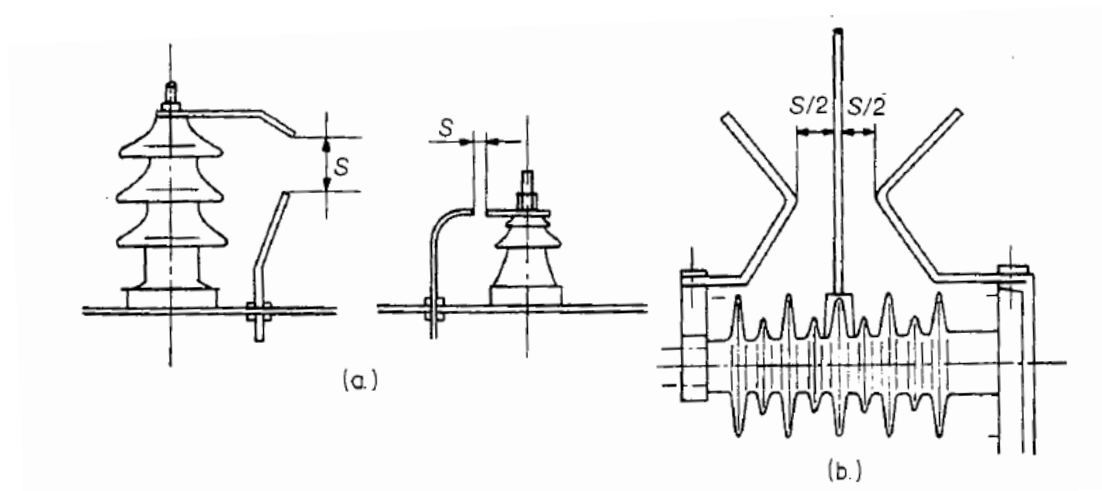
## 4.2 Kipinäväli

Suomessa kipinävälejä käytetään yleisesti alle 200 kVA:n pylväsmuuntamoissa. Tässä tarkoituksessa kipinävälien tehtävä on alentaa ulkoisen eristyksen jännitelujuus kesto-jännitetason yläpuolelle, jotta esimerkiksi käämityksen läpilyönnit vältettäisiin. Enintään 200 kVA:n muuntajilla on perusteltua käyttää kipinävälejä, koska muuntajat ovat koestettu jyrkillä jännitemuutoksilla ennen käyttöönottoa. Kipinävälejä käytetään myös usein avojohtojen valokaarisuojaksena, jolloin rakenteen tarkoitus on ohjata valokaaren kulkua. (Elovaara & Laiho 2007, 195)

Yleisimmät kipinävälirakenteet ovat muuntajan läpivientieristimien rinnalle kytkettävät yksivälisuoja, sekä suurjännite-erottimeen sijoitettava kaksivälisuoja. Yksivälisuoja rakentuu kahdesta elektrodista, tämän rakenteen ongelmana on eläinten eksyminen vaara-alueelle ja aiheuttaen näin valokaaren. Eläinten aiheuttamien ongelmien vuoksi, olisi hyvä asentaa yksivälisuojan yhteyteen erillinen eläinsuoja, kuten suojahattu. Kaksivälisuoja koostuu myös kahdesta elektrodista, lisäksi elektrodien väliin on asennettu keskielektrodi, joka toimii samalla eläinesteenä. Kipinävälit tulee aina asentaa suojattavan kohteen välittömään läheisyyteen. (Elovaara & Laiho 2007, 195)

Kipinävälin ylilyöntijännite riippuu elektrodien välisestä etäisyydestä, rakenteesta ja muodosta. Elektrodien etäisyys toisistaan valitaan niin suureksi, etteivät pientaajuiset ylijännitteet ja loivat transienttiylijännitteet johda ylilyöntiin. Ongelmana etäisyyden valitsemisessa on se, että etäisyys pitää toisaalta valita mahdollisimman pieneksi, jotta ilmastolliset ylijännitteet rajoittuisivat suojattavan kohteen eristysrakenteen kestotason alapuolelle. (Elovaara & Laiho 2007, 196)

Kuvassa 9 ovat yksivälisuoja, jonka elektrodien pituudet ( $S$ ) ovat 80mm ja 100mm, sekä kaksivälisuojaalla 60mm ja 80mm.



Kuva 9. Kipinävälirakenteet. (a) Yksivälisuoja. (b) Kaksivälisuoja. (Elovaara & Laiho 2007, 195)

Kipinävälin eduksi on laskettava yksinkertaisuus ja siitä johtuva komponentin edullisuus. Ongelmia kipinävälin käytössä on muutamia:

- Toiminta johtaa maasulkuun, jonka poistaminen vaatii jälleenkytkennän
- Syöksyännite alenee voimakkaasti kipinävälin toimiessa. Tämä on ongelmallista laitteille, joissa on käämityksiä
- Ylilyöntijännitteen iso hajonta asettaa haasteita luotettavan suojauksen rakentamiseen

(Elovaara & Laiho 2007, 196)

Kipinävälejä käyttäessä on huomioitava, että lyhyet käyttökeskeytykset ovat mahdollisia, sekä ilmastollisten ylijännitteiden esiintymistiheys olisi suhteellisen vähäinen. (Elovaara & Laiho 2007, 196)

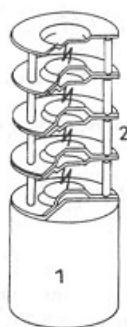
#### 4.3 Venttiilisuoijat

Paras tapa ehkäistä ylijännitteitä ovat venttiilisuoijat, jotka asennetaan suojattavan laitteen rinnalle, vaiheen ja maan väliin. On myös mahdollista kytkeä venttiilisuoijat vaihejohtimien väliin, jos tarve sitä vaatii.

Sähköverkossa olevat venttiilisuojat ovat malliltaan levykipinävälisuoja, magneetti-puhallussuojia, joita kutsutaan myös aktiivikipinävälisuojaiksi tai metallioksidisuoja. Käytännössä markkinoilla on enää tarjolla vain metallioksidisuoja, niiden hinnan, sekä teknisten ominaisuuksien vuoksi. (Elovaara & Laiho 2007, 196; Aro ym. 2015, 344.)

#### 4.3.1 Levykipinävälisuoja

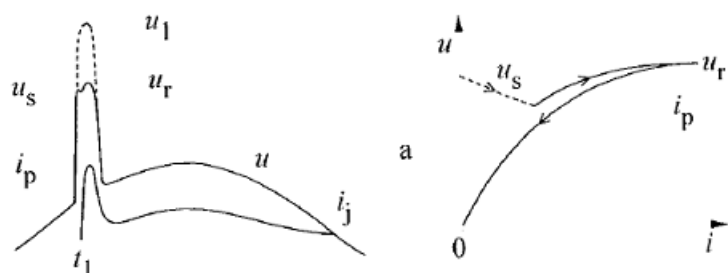
Levykipinäväli venttiilisuoja rakentuu kahdesta osiosta. Epälineaarista piikarbidivastuksesta (SiC) ja levymäisillä elektrodeilla useaan osiin jaetusta kipinävälistä. Kipinäväli on jaettu osiin, koska se vähentää syttymisjännitteen hajontaa, sekä loiventaa syntyvää jyrkkää jännitemuutosta. Kyseisistä komponenteista syntyvä paketti on suljettu hermeettisesti posliinikuoreen. Levykipinävälisuojan rakenne kuvassa 10. (Aro ym. 2015, 344.)



Kuva 10. Levykipinävälisuojan rakenne. (1) Epälineaarinen vastus. (2) Kipinävälit. (Aro ym. 2015, 344.)

Epälineaarinen vastus pyrkii rajoittamaan kipinävälin toiminnasta syntyvää maasulkuvirtaa pienemmäksi, jotta valokaari sammuu itsestään jännitteen nollakohdassa. Näin välttyttäisiin jälleenkytkennöiltä. Levykipinävälisuojan energianpurkauskkyky heikkenee ajan myötä, koska purkausvirrat kuluttavat kipinävälien elektrodeja, jolloin kipinävälien syttymisominaisuudet muuttuvat ja komponentti heikkenee. Kyseisiä suojia voidaan hyödyntää vain ukkosylijännitteiden rajoittamiseen. (Aro ym. 2015, 344.)

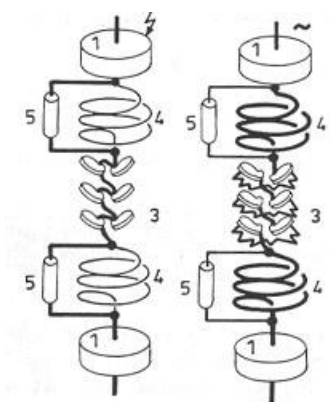
Kuvassa 11 on esitetty suojan yli vaikuttava jännite suojan toimiessa. Kun syttymisjännite  $u_s$  ylittyy, kipinävälit syttyvät ja toimintapiste siirtyy jännitevirta -ominaiskäyrälle. Vaikka ylijännite on mennyt jo ohitse, pysyy suoja johtavana ja sen läpi kulkeva jälkivirta aktiivisena. Tämä tilanne laukeaa siinä pisteessä kun kipinävälit hieman ennen käyttöjännitteen nollakohtaa pystyvät sammumaan. (Aro ym. 2015, 346.)



Kuva 11. Ylijännitteen rajoittuminen levykipinävälisuojan toimiessa ja suojan toimintapisteen siirtyminen.  $u_1$  on tulevan ylijännitteen huippuarvo,  $u$  käyttötaajuisen jännitteen huippuarvo,  $u_s$  syttymisjännite,  $u_r$  jäänösjännitteen huippuarvo,  $i_p$  syöksyvirran huippuarvo,  $i_j$  jälkivirran huippuarvo ja  $t_1$  syttymishetki. (Aro ym. 2015, 346.)

#### 4.3.2 Magneettipuhallussuoja

Magneettipuhallussuoja tai aktiivikipinävälisuoja on rakenteeltaan hieman kehittyneempi kuin levykipinävälisuoja. Magneettipuhallussuojassa on epälineaarisen vastuksen ja kipinävälien lisäksi sarjassa puhalluskäämejä ja ohitusvastuksia. Magneettipuhallussuojan rakenne kuvassa 12. (Aro ym. 2015, 345.)



Kuva 12. Magneettipuhallussuojan rakenne. (1) Epälineaarinen vastus. (3) Aktiivikipinäväli. (4) Puhalluskäämit. (5) Puhalluskäämien ohitusvastukset. (Elovaara & Laiho 2007, 198; Aro ym. 2015, 344.)

Puhalluskäämien ja ohitusvastuksien hyöty ylijännitetilanteessa tulee siinä, kun virran suurtaajuinen purkausvirta on purkautunut ohitusvastuksen kautta, niin jälkivirta ohjautuu ohitusvastuksista puhalluskäämeille. Puhalluskäämeissä jälkivirta synnyttää magneettikentän, joka puhaltaa kipinäväleissä syntyneen valokaaren pidemmäksi. Valokaaren pidentymisestä seuraa, että valokaarijännite kasvaa, jolloin jälkivirta pienee ja näiden toimien johdosta purkausvirta sammuu ennen verkkojännitteen nollassa kohtaa. Magneettipuhalluksen johdosta kipinävälien elektrodit kuluvat vähemmän ja suojan energianpurkauskkyky kasvaa. Tästä syystä magneettipuhallussuojia voidaan hyödyntää ukkosylijännitteiden lisäksi loivien transienttiylijännitteiden rajoittamiseen. (Elovaara & Laiho 2007, 198; Aro ym. 2015, 345.)

Kuvassa 13 on esitetty suojan toiminta ylijännitetilanteessa. Magneettipuhallussuoja ja levykipinävälisuoja toimivat lähes identtisesti. Ainoa ero tulee siinä, että puhalluksen seurauksena valokaarijännite on kasvanut, mikä johtaa siihen, että jälkivirta sammuu nopeammin. (Aro ym. 2015, 346.)



Kuva 13. Ylijännitteen rajoittuminen magneettipuhallussuojan toimiessa ja suojan toimintapisteen siirtyminen.  $u_1$  on tulevan ylijännitteen huippuarvo,  $u$  käyttötaajuisen jännitteen huippuarvo,  $u_s$  syttymisjännite,  $u_r$  jäänösjännitteen huippuarvo,  $i_p$  syöksyvirran huippuarvo,  $i_j$  jälkivirran huippuarvo ja  $t_1$  syttymishetki. (Aro ym. 2015, 346.)

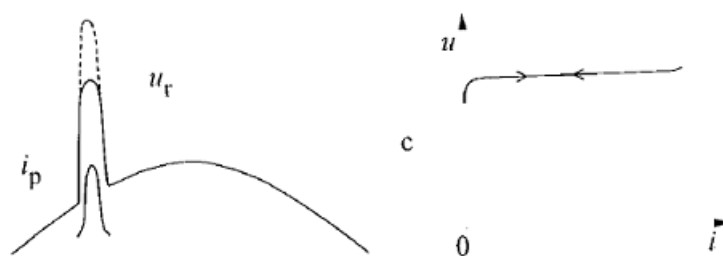
#### 4.3.3 Metallioksidisuojat

Metallioksidisuojat ovat vallanneet markkinoita viimeisen kahdenkymmenen vuoden aikana. Ne ovat kilpailukykyisempiä hinnalta, sekä niiden käyttöominaisuudet ovat paremmat kipinävälisiin venttiilisuijiin verrattuna. Käytännössä metallioksidisuojat ovat syrjäyttäneet kipinävälilliset suojat markkinoilla. (Aro ym. 2015, 345.)

Kun levykipinäventtiilivälisuojassa käytettiin piikarbidivastusta (SiC), niin metallioksidisuojan vastusmateriaalina käytetään sinkkioksidia (ZnO). Sinkkioksidin lisäksi vastukseen on lisätty myös muita metallioksidantteja, näiden tarkoitus on muuttaa vastuksen sähköisiä ominaisuuksia. Metallioksidisuoja rakentuu niin, että lieriömäisiä vastuselementtejä kytketään riittävä määrä sarjaan ja rinnakkain, jotta päästään haluttuun suojaustasoon ja energianpurkauskyykyyn. Tämän jälkeen vastuselementit suljetaan joko posliinista tai polymeeristä valmistettuun kuoreen. (Aro ym. 2015, 345.)

Metallioksidisuojan vastuselementin ydin on sinkkioksidia, jolloin pinta muodostuu muista metallioksidanteista, joita vastukseen on lisätty. Eri valmistajat käyttävät luonnollisesti omia vastusmateriaalikoostumuksiaan, jolloin metallioksidisuojat saattavat poiketa huomattavasti toisistaan sähköisiltä ominaisuuksiltaan. (Aro ym. 2015, 345.)

Kuvassa 14 on metallioksidisuoja ylijännitetilanteessa. Kuvasta huomataan, että toiminta on lähinnä ideaalista toimintaa. Suojan toimiessa ei tapahdu äkillistä jännitteen muutosta ja jälkivirta on hyvin vähäinen.



Kuva 14. Ylijännitteen rajoittuminen metallioksidisuojan toimiessa ja suojan toimintatapisteen siirtyminen.  $u_1$  on tulevan ylijännitteen huippuarvo,  $u$  käyttötaajuisen jännitteen huippuarvo,  $u_s$  syttymisjännite,  $u_r$  jäänösjännitteen huippuarvo,  $i_p$  syöksyvirran huippuarvo,  $i_j$  jälkivirran huippuarvo ja  $t_1$  syttymishetki. (Aro ym. 2015, 346.)

Suojan ongelmana on, että vastusmateriaali muuttuu käytön myötä. Normaalitilanteesakin vastuselementtien läpi kulkee pieni vuotovirta, joka kuluttaa materiaalia. Suuret virtapulsit ja mahdollisesti suojan sisään pääsevä kosteus altistaa myös vastusmateriaalin muutoksille. (Aro ym. 2015, 347.)

Kosteus suojassa voi johtaa siihen, että suojan sisäinen jännitteenjakauma häiriintyy, mikä taas voi laukaista osittaispurkauksia ja kemiallisia reaktioita. Näiden tekijöiden

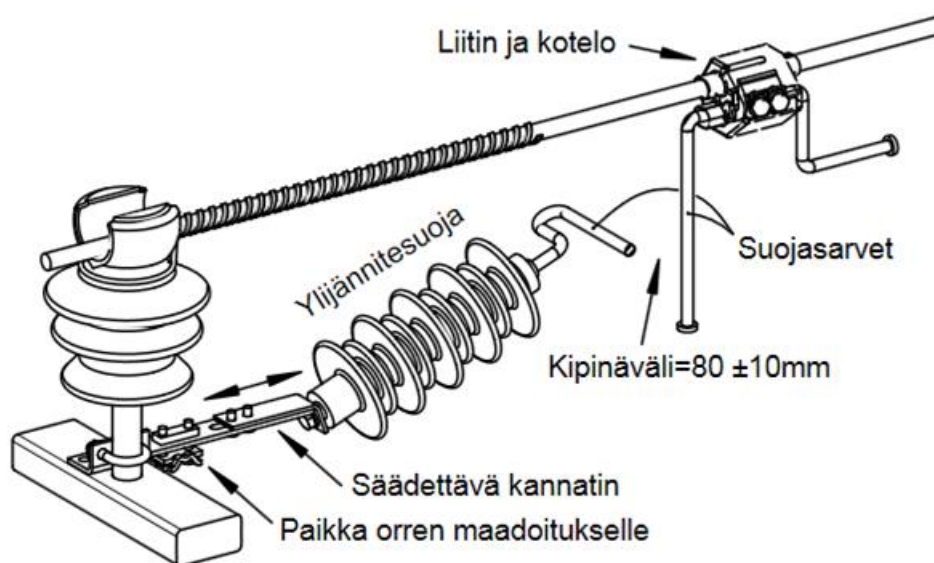


summana suojan resistiiviset ominaisuudet voivat muuttua käytön aikana josta seuraa, että vuovirta alkaa kasvamaan. Kemiallisten reaktioiden vuoksi vastuselementit on päällystettävä lasikuiturakenteella tai jollain muulla suojakerroksella. (Aro ym. 2015, 347.)

Keskijänniteverkossa metallioksidisuojat ovat nykyään suljettu polymeerillä, joka antaa paremman suojan kosteutta ja likaa vastaan jos verrataan posliinikuoreen. Polymeerisuojaalla on myös paremmat termiset ominaisuudet kuin posliinikuorisella, koska ne saadaan tiiviisti vastusten päälle. (Aro ym. 2015, 347.)

#### 4.4 Yhdistelmäsuojat

Virtaa rajoittava suoja rakentuu metallioksidisuojusta ja kipinävälistä, jotka kytketään sarjaan. Johdon suojauksessa on järkevää käyttää kyseistä yhdistelmää, koska vaadittava ylijännitesuojan koko on pienempi kuin jos käyttäisi pelkästään metallioksidisuoja. Suojauksen etuna on myös se, että suojauksen toimiessa ei aiheudu pikajälleenkytkentää verkossa. Myöskään elektrodien väliin eksyvät eläimet ja oksat eivät aiheuta suojauksen toimintaa. (Enston [www-sivut](http://www.enston.fi) 2017)



Kuva 15. Yhdistelmäsuoja. (Enston [www-sivut](http://www.enston.fi) 2017)

#### 4.5 Ylijännitesuojaus avojohtoverkossa

Vuonna 2015 Suomessa oli 1-70 kV:n jännitetasolla 107788 km avojohtoa, joka vastaa kokonaismäärästä noin 76 %. Yhteensä verkkoa on 141303 km. Avojohtoon määrä tulee pienenemään vuosi vuodelta, koska vuonna 2013 voimaan tullut sähkömarkkina-laki velvoittaa verkkoyhtiöitä rakentamaan säävarmaa sähköverkkoa. Vielä vuonna 2010 avojohtoon osuus koko verkosta oli noin 83 %. Tästä johtuen Ilmalinjat vähenevät ja entistä enemmän sähköverkkoa maakaapeloidaan. (Energiateollisuuden www-sivut 2017)

##### 4.5.1 Kipinävälit

Suomessa käytäntö on ollut, että enintään 200 kVA muuntajat voidaan suojata kipinäväleillä. Edellytys on, että muuntaja on mitoitettu kestäämään kipinävälin toiminnasta syntyvät ylijännitteet ja jyrkät jännitemuutokset. (Aro ym. 2015, 363.)

Taulukossa 1 esitetään kipinävälien 1 % syttymisjännitteet vaihtojännitteellä ja 99 % suojaustasot salamasyöksyjännitteellä 1,2/50  $\mu$ s ja lineaarisesti nousevalla 1000 kV/ $\mu$ s. Kuvasta voidaan päätellä, että syttymisjännite on kaikilla asetteluilla riittävän korkea verrattuna keskijänniteverkon käyttöjännitteeseen. Normaalitilanteessa kipinävälit eivät siis syty. (Aro ym. 2015, 365.)

Taulukko 1. Pylväsmuuntamoiden saavutettavat suojausominaisuudet. (Aro ym. 2015, 366.)

Suojan tyyppi	1% syttymisjännite $U_1$ /kV 50 Hz, sadekoe	99 % suojausjännite $u_p$ /kV	
		1,2/50 $\mu$ s	1000 kV/ $\mu$ s
Yksivälisuoja 100 mm	39	120	268
Kaksivälisuoja 80 mm	42	124	229
Yksivälisuoja 80 mm	32	99	217
Kaksivälisuoja 60 mm	35	103	179

#### 4.5.2 Venttiilisuojat

Ylijännitesuojan rakenteella ei ole väliä, sillä sijoittamista koskevat säännöt ovat samat sekä kipinävälilliselle, että kipinävälittömälle suojalle. On hyvä huomata, että venttiilisuojiin nimellissuojaustaso on voimassa vain silloin, kun suojattava kohde on välittömässä läheisyydessä. Jos näin ei ole, on otettava huomioon ylijännitteen kulkuaal-  
lostasta johtuva jännitteen nousu venttiilisuojan jälkeisellä johto-osalla. (Aro ym. 2015, 355.)

Jos suojattava kohde on johdon päässä ja venttiilisuoja asennetaan johdolle kohteen eteen, venttiilisuojan todellinen suojaustaso saadaan kaavasta 3. Tässä tapauksessa maapiiri oletetaan tehokkaaksi verkoksi, jonka induktanssi on häviävän pieni. (Aro ym. 2015, 356.)

Kaava 3.

$$u_{ptod} = u_p + \Delta u_1 + \Delta u_2 = u_p + (d_1 + d_2)\ell \frac{\Delta i}{\Delta t} + \frac{2SD}{v}$$

$u_{ptod}$	= todellinen suojaustaso
$u_p$	= venttiilisuojiin kilpiarvojen suojaustaso
$\Delta u_1$	= induktiivinen jännitehäviö suojan liitos- ja maadoitusjohtimissa
$\Delta u_2$	= venttiilisuojan ja suojattavan kohteen välisellä matkalla syntyvä jännitteen nousu
$d_1$	= venttiilisuojan liitäntäjohtimen pituus
$d_2$	= venttiilisuojan maadoitusjohtimen pituus
$\ell$	= liitäntä- ja maadoitusjohtimen induktanssi (noin $1 \mu H/m$ )
$\frac{\Delta i}{\Delta t}$	= syöksyvirran jyrkkyys
$S$	= tulevan lineaarisesti nousevan syöksyjännitteen jyrkkyys
$D$	= suojattavan kohteen ja venttiilisuojan välinen etäisyys
$v$	= syöksyjännitteen etenemisnopeus

#### 4.6 Ylijännitesuojaus PAS-verkossa

PAS-johdon suojaus vaatii ottamaan huomioon PEX-muovipäällysteen, jolla johdin on suojattu. Johto-osille jossa ylijännite on mahdollinen, on tehtävä valokaarisuojaus. Salamanisku synnyttää valokaaren kun isku osuu suoraan ilmajohtoon tai ilmajohtoon lähellä ja indusoi johtoon ylijännitteen. Syntynyt ylijännite synnyttää valokaaren lähimmällä pylväällä, orren ja johdon välille. PAS-johdolle tämä tuottaa ongelmia,

koska muovipäälyste estää valokaaren purkautumisen. Valokaaren syttyessä muovipäälysteeseen palaa pieni reikä. Palo jatkuu paikallaan niin kauan, kunnes johdin vaurioituu tai palaa kokonaan poikki. Tästä syystä PAS-johdoille on asennettava valokaarisuojaus sopiviin kohtiin, jotta vahingoilta välttyttäisiin. Avojohtoilla tätä ongelmaa ei ole, jolloin ylijännite siirtyy vapaasti ilman esteitä. (Enston www-sivut 2017)

Valokaarisuojien sijoittelussa kannattaa ottaa huomioon paikat, joissa ylijännitteen riski on selvästi suurempi. Tällaisia paikkoja ovat esimerkiksi korkeat maastonkohdat sekä avonaiset alueet, kuten pellot. Lisäksi paikoille, joissa ihmiset liikkuvat tai oleskelevat on asennettava valokaarisuojaus. Suojauksen tarkoituksena on antaa valokaarelle helppo purkautumisreitti. Samalla saadaan suojattua myös verkon muita komponentteja ja päästään lähemmäs häiriöttömämpää sähkönjakelua. (Enston www-sivut 2017)

Valokaarisuojauksessa on mahdollista käyttää neljää erilaista vaihtoehtoa:

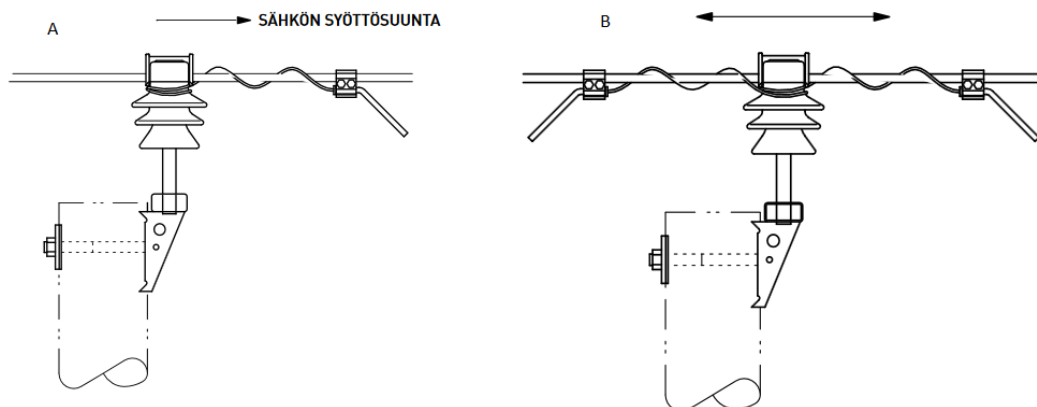
- Valokaarisuoja
- Kipinäväli
- Ylijännitesuoja
- Virtaa rajoittava suoja

Suojauksen valinnassa pitää ottaa huomioon verkon oikosulkuvirta. Taulukossa 2 on esitetty suojattavassa kohteessa oleva oikosulkuvirta ja siihen sopiva suojaus. Valinnassa on syytä huomioida myös, että valokaarisuoja ja kipinäväli aiheuttavat aina toimiessaan pikajälleenkytkennän. (Enston www-sivut 2017)

Taulukko 2. (Enston www-sivut 2017)

Orsityyppi	Oikosulkuvirran arvo (virta/kA)	Suojaustavat
PAS	n. 1.0	Kipinäväli, ylijännitesuoja, virtaa rajoittava suoja
PAS	1.5–3.0	Valokaarisuoja kaksoislangalla, kipinäväli, ylijännitesuoja, virtaa rajoittava suoja
PAS	> 3.0	Valokaarisuoja, kipinäväli, ylijännitesuoja, virtaa rajoittava suoja
Avojohtovaiheväli PAS:lla		Kipinäväli, ylijännitesuoja, virtaa rajoittava suoja

Valokaarisuojan ajatuksena on, että se ohjaa syntyvän valokaaren kauaksi johtimesta sekä eristimestä. Valokaarisarvia, joita kutsutaan myös kipinäsarviksi, voidaan käyttää tappi- ja tukieristimillä mutta haaroituksissa ja vetoeristimillä on järkevämpää käyttää kipinäväliä. Valokaarisarvet tulee aina asentaa sähkön syötön suuntaan. Rengasverkossa sarvet asennetaan eristimen molemmille puolille. Muilla suojilla ei ole väliä, kummalla puolella eristintä suoja sijaitsee. (Enston www-sivut 2017)



Kuva 15. Säteittäinen verkko (A) ja rengasverkko (B), jossa valokaarisarvet ovat asennettu syötön suunnan mukaan. (Enston www-sivut 2017)

PAS-johdon suojausta suunniteltaessa on syytä pohtia, miten suojauksen lopulta halua toteuttaa. Edullisimmat komponentit ovat valokaarisuoja ja kipinäväli mutta ne aiheuttavat jälleenkytkennän. Venttiilisuojat ovat taas muihin komponentteihin nähden hinnaltaan korkeat ja johdon suojaukseen tarvitaan runsaasti valokaarisuojia, joten pelkästään venttiilisuoilla rakennettu ratkaisu ei olisi taloudellisesti järkevää. PAS-johdon suojauksessa järkevintä voisi olla käyttää yhdistelmäsuojaa, joka tuo venttiilisuojan edut mutta hieman edullisempaan hintaan johtuen venttiilisuojan pienemmästä koosta.

#### 4.7 Ylijännitesuojaus maakaapeliverkossa

Maakaapeliverkon pituus Suomessa kasvaa tällä hetkellä huimaa vauhtia. Tähän vaikuttaa jo edellä mainittu sähkömarkkinalaki, joka velvoittaa verkkoyhtiöitä rakentamaan säävarmaa verkkoa. Vuonna 2010 1-70 kV maakaapelia oli 13547 km, joka vastasi noin 10 % koko verkosta. Vuonna 2015 kaapelia oli 22132 km, joka vastasi noin

16 % koko verkosta. Maakaapelointiaste tulee tulevina vuosina vielä kasvamaan reilusti, sillä monet verkkoyhtiöt ovat lähteneet rakentamaan säävarmaaverkkoa juuri maakaapeloinnilla. (Energiateollisuuden www-sivut 2017)

Salamien aiheuttamat ylijännitteet ovat vähäisempiä maakaapeliverkossa kuin avojohto-osuuksilla. Kaapelien suojauksena käytetään venttiilisuoja. Lyhyillä kaapelipituuksilla kuten 30 - 50 m ylijännitesuojat sijoitetaan kaapelin loppupäähän. Pidemmillä kaapeleilla ja jos kaapeli sijaitsee avojohtoverkon välissä, kaapeli suojataan molemmista päistä. (Aro ym. 2015, 359.)

Kaikissa tilanteissa venttiilisuoja ja kaapelivaippa pitää maadoittaa samaan pisteeseen. Kaapelivaipan ja venttiilisuojan maadoituksen tarpeelliset yhdysjohtimet on myös tärkeää pitää riittävän lyhkäisinä. (Aro ym. 2015, 360.)

#### 4.8 Muuntajien suojaus

Paras tulos muuntajien suojauksessa saadaan sillä, että venttiilisuoja pystytetään asentamaan aivan muuntajan viereen. Tällöin ei ole tarpeen ottaa huomioon jännitteennouksuja, jotka syntyisivät pidemmällä matkalla. (Aro ym. 2015, 359.)

Maakaapeliverkon keskelle sijoitettavan puistomuuntajan suojauksessa on lähdetty siitä lähtökohdasta, että kaapeliverkko suojaa itse itseään. Riittävänä suojauksena olisi, että kaapeleiden alkuun sijoitetaan ylijännitesuojat. Näin ollen kaapeliverkon keskellä olevaa muuntajaa ei tarvitsisi suojata ylijännitesuojilla. Täyttä varmuutta suojauksen tarpeellisuudesta ei kuitenkaan ole. Tilanteessa jossa salama on osunut lähelle kaapelin alkupistettä, saattaa muuntajille muodostua ylijännite, joka rikkoo komponentin. Tämä voidaan tietenkin ehkäistä asentamalla kaapeliverkon ensimmäiselle muuntajalle ylijännitesuojat. (Ahonen 2010, 26)

## 5 LOPPUPÄÄTELMÄT

Ilmastollisista syistä syntyvät ylijännitteet ovat suurin ylijännitteiden aiheuttaja keski-jänniteverkossa. Ilmastolliset ylijännitteet syntyvät salamaniskuista, joko suoraan johtimeen tai indusoituneena jolloin salama on osunut johdon lähistölle. Ylijännite voi syntyä myös takaiskuna mutta niitä esiintyy lähinnä verkoissa, joissa on käytössä ukkosjohtimia. 20 kV jännitetasolla merkittävin on johtimien lähelle osuneet salamat, jotka aiheuttavat indusoitumisen kautta ylijännitteen verkkoon. Tilastollisesti suurin mahdollisuus ilmastollisten ylijännitteiden syntyyn Suomessa on heinä-elokuu, jolloin on maasalamoita keskimääräisesti eniten.

Ylijännitesuojilla voidaan suojata verkon komponentteja ylijännitteiltä. Edullisin ja yksinkertaisin ylijännitesuoja on kipinävälisuoja. Näitä suositellaan lähinnä alle 200 kVA:n muuntajille. Kipinävälisuoja ongelma on, että ne aiheuttavat aina toimiessaan maasulun, joka vaatii jälleenkytkennän. Toinen vaihtoehto on venttiilisuoja, jotka ovat kalliimpia kuin kipinävälisuoja, mutta niiden etu on siinä, että ne eivät aiheuta jälleenkytkentää. Venttiilisuoja ovat ominaisuuksiltaan paremmat, joten ne kestävät ylijännitteitä paremmin kuin kipinävälit. Käytännössä markkinoilla olevat venttiilisuoja ovat nykyään pelkästään metallioksidisuoja. Venttiilisuoja päästäisiin lähes häiriöttömään sähkönjakeluun, mutta se ei välttämättä olisi kustannustehokasta. Myös yhdistelmäsuojaa, eli kipinävälin ja metallioksidisuoja yhdistelmää voidaan käyttää.

Ylijännitesuojauksen toteutuksessa on syytä ottaa huomioon millainen verkko on rakenteeltaan ja millaista maasto on verkon ympärillä. Ylijänniteriski on suurin korkeilla maaston kohdilla ja avonaisilla alueilla esimerkiksi peltoaukeilla. Maaseutuverkolle tämä aiheuttaa ongelmia jos halutaan päästä mahdollisimman häiriöttömään sähkönjakeluun. Johtolähdöt saattavat olla hyvinkin pitkiä, mutta asiakkaita ei välttämättä ole kovinkaan paljon. Häiriötöntä sähkönjakelua tavoiteltaessa muuntajat tulisi suojata venttiilisuoja, mutta tällaisessa verkossa se ei olisi kustannustehokasta.

Kaapelointiasteen kasvaessa, ilmastolliset ylijännitteet aiheuttavat yhä vähemmän haittaa sähköverkolle. Kaapeliverkon päät tulisi suojata ylijännitesuoja, sekä verkon

ensimmäinen muuntaja, jolloin voitaisiin ajatella, että loppu kaapeliverkko suojaa itse itsensä.



## LÄHTEET

Elovaara, J. & Laiho, Y. 2007. Sähkölaitostekniikan perusteet. Helsinki: Otatieto

Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen, K. & Palva, V. 2015. Suurjännite-tekniikka. 4. Helsinki: Otatieto

SFS-EN ISO 601. Suurjännitesähköasennukset ja ilmajohdot. High-voltage electrical installations and overhead lines. 2009. Finnish Standards Association SFS. Helsinki: SFS

Ahonen, P 2010. Keski-jänniteverkkojen ylijännitesuojaus- ja jälleenkytkentätarkastelut ylijännitelaskentaohjelmiston avulla. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Investigations of overvoltage protection and reclosing operations in medium voltage network. Viitattu 15.5.2017. [https://webhotel2.tut.fi/units/set/opetus/pdf%20julkiset%20tyot/Ahonen\\_Pasi\\_julk.pdf](https://webhotel2.tut.fi/units/set/opetus/pdf%20julkiset%20tyot/Ahonen_Pasi_julk.pdf)

Ilmatieteen laitoksen www-sivut. Viitattu 15.5.2017. <http://ilmatieteenlaitos.fi/>

Enston www-sivut. Viitattu 15.5.2017. <https://www.ensto.com/>

Energiatieteiden www-sivut. Viitattu 15.5.2017. <http://energia.fi>

## LITTEET